

CONTABILIDADE METALÚRGICA EM CADEIA PRODUTIVA DE GRANDE PORTE*

Lúcio Fábio Dias Passos¹

Ítalo Figueiredo de Paula²

Jedson Damasceno³

William Barbosa⁴

Bianca Talitha Goncalves Pinto⁵

Otávio Henrique Grenfell⁶

Resumo

Dados confiáveis são imprescindíveis para contabilidade metalúrgica de produção, contudo em cadeias produtivas de grande porte é comum a existência de fluxos de material ou estoques não medidos apropriadamente, ou até mesmo desconhecidos, causando um apontamento impreciso no balanço de massa. Este trabalho apresenta os requisitos para uma solução moderna e aderente ao código AMIRA P754 para a contabilidade metalúrgica. Inicialmente os dados de medição são validados e pré-processados para remoção de erros grosseiros e anomalias. Em seguida a reconciliação de dados é executada usando dois mecanismos que distribuem as incertezas entre medidas, perdas e massas acumuladas. O sistema foi testado na Samarco S.A. utilizando a Plataforma Nexum® Digital, seguindo especificações técnicas propostas pela mineradora, e se mostrou bem-sucedido ao atestar de maneira coerente os fechamentos de produção, perdas e massas acumuladas ao longo da cadeia.

Palavras-chave: Reconciliação de Dados; Balanço de Massa; Contabilidade Metalúrgica; AMIRA P754.

METALLURGICAL ACCOUNTING IN A LARGE PRODUCTION CHAIN

Abstract

Reliable data is essential for metallurgical production accounting. However, in large production chains, it is common to have material flows or stocks not measured properly, or even that are unknown, causing an inaccurate indication in the mass balance. This work presents the requirements for a tool compatible with the AMIRA P754 code for metallurgical accounting. Initially the data are validated and pre-processed to remove gross errors and anomalies. Then, data reconciliation is performed using two mechanisms that distribute uncertainties between measurements, losses, and accumulated masses. The system was tested at Samarco S.A. using the Nexum® Digital Platform, Balance and Health modules, following technical specifications proposed by the mining company and proved to be successful in consistently attesting the total production, losses and accumulated mass throughout the entire chain.

Keywords: Data Reconciliation; Mass Balance; Metallurgical Accounting; AMIRA P754.

1. *Professor na Escola de Engenharia da UFMG. Líder de Projetos da Tagna Tecnologia.*
2. *Engenharia de Processos da Tagna Tecnologia*
3. *Mestre em Engenharia Elétrica e Diretor de Tecnologia da Tagna Tecnologia.*
4. *Engenharia de Processos da Samarco Mineração.*
5. *Centro de Operação Integrada e Planejamento da Samarco Mineração.*
6. *Tecnologia da Informação da Samarco Mineração.*

1 INTRODUÇÃO

Dados confiáveis são chave em tomadas de decisão, e um bom exemplo são os dados usados na contabilidade metalúrgica de produção, inventários e perdas físicas. Em plantas modernas, os dados são obtidos de maneira automática e em alta frequência, o que elimina erros decorrentes de registros manuais. Contudo, a aquisição destes dados pode ser corrompida durante a medição, processamento e transmissão, resultando em dados que podem estar incoerentes entre si [1].

Além disso, mesmo em plantas altamente instrumentadas, é comum a existência de fluxos de material ou estoques que não são medidos ou estimados apropriadamente, ou até mesmo que são desconhecidos. Por exemplo, em pátios de estocagem de minério ocorre o desprendimento de poeira nas pilhas de produtos, cujo volume é muito difícil de mensurar. A ausência de medidas confiáveis nestes fluxos e acúmulos de massa afetam a totalização da produção e inventários e causam um apontamento impreciso para as diferenças no balanço de massa. E isso é um problema, pois afeta tanto a cadeia produtiva, gerando perda de eficiência e riscos operacionais, quanto a cadeia comercial, impactando na contabilidade patrimonial e nas relações com clientes e fornecedores. [2]

A solução de tal incoerência entre medições é chamada reconciliação de dados (RD). A RD é um algoritmo de otimização que utiliza restrições do modelo – conservação de massa, energia e componentes – e obtém estimativas para as variáveis pelo ajuste das medidas, de modo a satisfazer estas restrições. Nesse método, o maior erro é atribuído à medição de maior incerteza, e a soma desses erros é ponderada de acordo com a precisão dos instrumentos ou a confiabilidade das estimativas de valores não medidos.

Entretanto, a aplicação da RD em cadeias de mineração de grande porte pode ser desafiadora. Sua capacidade de distribuir adequadamente a incerteza dependente do número de fluxos medidos ou ao menos estimados, isto é, sua acurácia cresce quanto maior for o número de medições redundantes. E, mesmo em plantas modernas, é comum a ocorrência de locais com acúmulo de massa desprovidos de meios eficientes e rápidos para mensuração de volume e massa, tais como, bacias de rejeito, espessadores, pilhas-pulmão, pátios de estocagem e minerodutos. Outros complicadores são a presença de fluxos não medidos, tais como, transbordos de caixas, drenos, perdas ao chão, pilhas de emergência, incorporações e a escassez de amostras para teores metálicos [3]. Este trabalho apresenta uma solução inovadora para este problema, baseado na segmentação e coaptação do processo ao longo de diversos fluxogramas.

Um outro aspecto deste trabalho é apresentar uma extensão para a Reconciliação de Dados (RD) que acrescenta técnicas de Validação ao escopo de tratamento dos sinais, chamada Reconciliação e Validação de Dados (RVD). A validação consiste em um pré-processamento de dados que detecta não conformidades nos instrumentos de medição, e os classifica segundo a qualidade dos sinais gerados. A validação também é responsável por detectar e remover erros grosseiros nas medidas, empregando a reconstrução de sinais corrompidos, antes destes serem usados pela RD. [4, 5]

Este trabalho apresenta uma solução de RVD, baseada na Plataforma Digital Nexum®, Módulos Balance e Health, e foi desenvolvido em parceria com a Samarco S.A., atendendo as especificações técnicas da mineradora, e implantado em toda sua cadeia produtiva, desde a mina até o porto, passando pelo beneficiamento,

mineroduto e pelotização. A seção 2 apresenta os requisitos técnicos desse tipo de solução e a seção 3, os resultados de sua aplicação na cadeia da Samarco.

2 REQUISITOS PARA UM SISTEMA AUTOMÁTICO DE CONTABILIDADE METALÚRGICA

A necessidade de a contabilidade de metais ser conduzida ao nível dos padrões de “contabilidade financeira” no que diz respeito à auditabilidade e transparência, por exemplo, já é reconhecida há algum tempo, especialmente quando observamos os princípios rigorosos do código AMIRA P754. A AMIRA é uma organização independente, global e sem fins lucrativos que representa membros do setor da mineração. Em outubro de 2005, a AMIRA divulgou o resultado de um extenso projeto para padronizar as práticas de contabilidade de metais. O resultado foi o Código de Prática P754 para Contabilidade de Metal, que inclui 10 diretrizes claras de governança para melhores práticas em contabilidade de metais. Indústrias que ainda usam planilhas eletrônicas para sua contabilidade de metais, podem não cumprir todos esses requisitos. [6]

Observando o sistema original de contabilidade da Samarco, baseado em planilhas eletrônicas, pôde-se constatar a prática de inserção manual de dados de teor, massa totalizada e incertezas das medições, sem possibilidade de rastreio da origem de cada informação. Ao mesmo tempo, a reconciliação desempenhada por macros ou suplementos matemáticos utiliza parâmetros também declarados manualmente, e sem um critério consistente sobre suas escolhas. Outro problema é a falta de automatismo no processo de fechamento, visto que ele requer a execução de uma sequência de tarefas a serem seguidas e memorizadas pela pessoa competente, às vezes ainda demandando tomadas de decisão sobre a melhor estratégia a ser seguida. Essa abordagem possui fragilidades evidentes, como o risco de ignorar alguma etapa, risco de erros de digitação ou do uso de informações pouco confiáveis e o risco de uma tomada de decisão ruim, pouco transparente e sem padronização. Outra fragilidade é a dificuldade natural do humano na hora de integrar adequadamente múltiplas fontes de informações, tais como relatórios de calibração, inventários de estoque, dados oriundos de instrumentos de campo e dados de laboratório, o que pode estender a duração do trabalho em algumas horas. O resultado são fechamentos demorados e que, mesmo sendo realizados por profissionais competente, geram resultados alvos de contestações e até conflitos entre interessados.

Hoje, sistemas modernos de balanço de massa e contabilidade de metais fazem uso das mais recentes tecnologias de otimização e análise de dados. Construído sob a filosofia de um RVD, a Plataforma Nexum®, módulos Health e Balance, permite a validação dos instrumentos (função V) e a reconciliação de medidas em cadeias produtivas de grande porte (função RD), que incluem estoques intermediários de difícil mensuração, tais como pilhas pulmão, pátios, minerodutos, espessadores e bacias de rejeitos, com total aderência ao código AMIRA P754. Nas seções seguintes são apresentados os requisitos propostos neste trabalho para um sistema moderno, autônomo e auditável de contabilidade metalúrgica.

2.1. Filosofia, arquitetura e principais funcionalidades

A arquitetura de um RVD deve contar com coletores de dados integrados com os principais sistemas de automação e informação (PIMS, LIMS, MES, SAP etc.), e um

serviço que corrija e reconcilie as medidas coletadas, mantendo uma versão coerente e confiável dos dados de produção, perdas e estoques.

Entre as principais funcionalidades do RVD, solicitadas na especificação técnica da Samarco [10], destacamos:

Tabela 1 – requisitos da especificação técnica da Samarco

FUNÇÃO V	Deteção automática de erros sistemáticos no sistema de medição integrado com dados de calibração emitidos por instrumentistas
	Monitoramento da saúde de instrumentos de medição com alerta de falhas e remoção de erros grosseiros em seus sinais
	Repositório de relatórios de calibração, com possibilidade de registro via aplicativo móvel
FUNÇÃO RD	Contabilidade metalúrgica de produção, perdas e estoques com fechamento diário reconciliado
	Estimação de massa acumulada em estoques intermediários integrado com procedimentos de inventário
	Relatórios de produção mássico-hídrico-metalúrgico acumulada por período e discriminada por áreas de processo, tipo de produto e ordem de produção
	Relatório comparativo entre medidas brutas e reconciliadas para auxiliar na identificação de falhas iminentes de medição, ou perdas físicas
	Editor de fluxogramas com interface gráfica amigável
REQUISITOS GERAIS	Alerta de desvio anormal em valores de fechamentos, além de índice de disponibilidade na coleta de dados que, no caso de queda de comunicação, aciona um sistema automático de recuperação a partir de uma fonte secundária de dados
	É desejável que o servidor esteja alojado em nuvem, com coletores de dados locais e redundantes, integrados com protocolo proprietário para garantir níveis elevados de segurança cibernética e <i>bufferização</i> para suprir repentinas quedas de comunicação sem perda de dados
	Controle de acesso de usuários customizados para perfis de uso, tais como: Instrumentista, Gestor; Auditor; Técnico de Fechamento; Engenheiro do Processo
	Relatórios e painéis em interface <i>web</i> compatível com <i>desktop</i> e <i>smartphone</i>
	Sistema 100% auditável, com rastreamento de cálculos e mudanças de parâmetros usados na reconciliação.

2.2. A equação do balanço de massa adaptada a processos minerais

Para escrever uma equação que represente o balanço de massa em um dado ponto do processo, é necessário definir um volume de controle (VC), ou seja, um espaço por onde se observa a entrada e saída de massa, além de possíveis gerações, consumos e acúmulos de massa em seu interior.

A equação do balanço de massa usada nesse trabalho é:

$$ENTRA \pm \Delta ENTRA - SAI \pm \Delta SAI - PERDAS \pm \Delta PERDAS - ACUMULADO = 0 \quad \text{eq.1}$$

O termo *ENTRA* refere-se aos fluxos de alimentação das operações, tanto de matéria-prima, quanto reagentes e água. O termo *SAI* refere-se aos fluxos de produtos e rejeitos gerados por uma operação, mas também pode se referir aos diversos tipos de perdas de massa que são comuns em processos minerais, tais como processo de drenagem de mina, transbordos, partículas sólidas no *overflow* de espessadores e perdas ao chão e ao ar durante o transporte ou estocagem, como o desprendimento de poeira. Na equação 1, tais tipos de saída que não seguem o fluxo normal da cadeia foram segregados concentrados no termo *PERDAS*.

A estocagem de material é bastante comum na mineração, e o termo *ACUMULADO* está associado à formação de estoques de minério por alguma razão, seja uma reserva para paradas previstas, paradas de emergência, estoques de produtos e matérias-primas ou simplesmente um estoque pulmão para homogeneização de material ou entre operações com *lead time* diferentes. Além disso, silos, tanques,

vagões ferroviários, espessadores e minerodutos também constituem equipamentos geradores de acúmulos de massa. Quando a equação de balanço é aplicada em um intervalo de tempo, o termo pode assumir valores positivos, se a massa estocada no início do intervalo é menor do que no fim, ou seja, ganho de massa, ou negativo no caso contrário.

Nota-se também que na equação não estão presentes termos referentes à ocorrência de reação química, com formação ou consumo de produtos dentro do volume de controle. Em processos de mineração de minério de ferro, as operações majoritárias são de cominuição e concentração, sendo possível desprezar os termos de geração e consumo.

Por fim, é preciso considerar que os valores dos fluxos mássicos nos termos “ENTRA”, “SAI” e “PERDAS” nunca são obtidos com perfeita exatidão, tanto devido às limitações nos mecanismos de medição, quanto em razão da possível existência de fluxos não medidos, ou até mesmo desconhecidos. Estes fatores impedem um fechamento coerente do balanço e por isso, na equação estão presentes termos complementares “ Δ ENTRA”, “ Δ SAI” e “ Δ PERDAS” para comportá-los.

2.3. Modelo matemático reconciliação de dados via otimização

A solução para a reconciliação de dados (RD) pode ser alcançada por meio de métodos matemáticos que minimizam a diferença quadrática entre variáveis medidas e suas versões reconciliadas, satisfazendo restrições dadas por modelos característicos de conservação de massa e componentes. O resultado distribui os desvios nos balanços entre variáveis (medidas ou estimadas) de acordo com sua precisão e confiabilidade, obtendo-se uma versão coerente dos dados entre si. [3]

A formulação geral de métodos de otimização matemática possui a forma:

$$\begin{aligned} \text{minimizar: } J(\hat{\mathbf{y}}, \hat{\mathbf{z}}) &= (\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}})^T \mathbf{V}^{-1} (\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}) \\ \text{sujeito à: } \mathbf{f}(\hat{\mathbf{y}}, \hat{\mathbf{z}}) &= \mathbf{0} \\ \mathbf{g}(\hat{\mathbf{y}}, \hat{\mathbf{z}}) &\geq \mathbf{0} \end{aligned}$$

Onde, $\mathbf{y}$ representa as variáveis medidas, $\hat{\mathbf{y}}$ as variáveis estimadas e $\hat{\mathbf{z}}$ as variáveis não mensuráveis (observadas). As incertezas das medidas são representadas pela diagonal principal da matriz de covariância $\mathbf{V}$ e as restrições de igualdade e desigualdade que compatibilizam o problema com a realidade física do processo são dadas pelas equações $\mathbf{f}$ e $\mathbf{g}$.

Em processos minerais sem reações químicas significantes, as restrições de igualdade geralmente são compostas por equações de conservação de massa e de componentes, resultando num sistema de equações lineares. As restrições de desigualdade, por sua vez, impõem limites práticos para as variáveis e são essenciais para a convergência do problema. Uma boa prática é determinar estes limites a partir de registros históricos das variáveis.

2.4. Segmentação da cadeia: estratégia para tratar acúmulos de massa de grande volume e difícil mensuração

Conforme já exposto, em grandes cadeias produtivas há maior possibilidade da presença de estoques de grandes volumes, porém com medição pouco precisa ou com frequência de amostragem muito espaçada (de dias, ou semanas), tais como pátios de estocagem, minerodutos, bacias de rejeitos, espessadores, pilhas pulmão.

Quando um estoque com essas características é incluído em um modelo matemático para reconciliação de dados, a incerteza envolvendo sua medição acaba sendo enorme comparado com as outras incertezas do problema, e ela acaba capturando para si todas as diferenças nos balanços de massas, como se fosse um “ralo de incertezas”.

Problema similar ocorre quando há um fluxo não medido ou com atraso de transporte de grande magnitude comparado com os demais fluxos do processo. Problemas com essas características podem ser solucionados pela decomposição em subproblemas, tal como discutido em [2,7]. A solução proposta neste trabalho consiste numa adaptação desta ideia, onde a cadeia é segmentada em subpartes, cada uma representada por um fluxograma isento de variáveis não medidas. Em seguida, cada um desses fluxogramas é reconciliado separadamente e grandes fluxos ou estoques não medidos ficam excluídos destes segmentos, e se tornam elementos de “conexão entre fluxogramas”. Simultaneamente, é feita a “junção” desses fluxogramas parciais em um processo de coaptação, que ocorre sempre que for possível identificar que a variável não medida está estacionária ou quando ela foi mensurada por algum processo externo do tipo batimetria, topometria etc.

Neste trabalho, a reconciliação dos segmentos (ou fluxogramas parciais) foi realizada em uma abordagem transacional, ou seja, o algoritmo de otimização é alimentado pela versão totalizada dos fluxos em um período de 24h, e pelas variações de estoque apuradas pela diferença entre o volume inicial e final deste mesmo período. Esta reconciliação conta apenas com variáveis medidas e por isso é capaz de identificar o total de erros de medição e/ou fluxos de perdas de baixa magnitude e, dependendo do nível de redundância, pode até distinguir entre um caso e outro.

Já o processo de coaptação usado para a junção dos fluxogramas parciais opera em momentos em que foi detectado que a variável de difícil mensuração está ao menos estacionária ou foi mensurada por algum mecanismo externo de inventário. A junção dos segmentos é realizada comparando-se a totalização dos fluxos das bordas dos fluxogramas (adjacentes ao estoque não medido) durante o período de estacionariedade deste estoque ou durante o período compreendido entre dois inventários. Com este processo é possível determinar os erros de tendência das medidas que formam a conexão entre os dois fluxogramas.

2.5. Tratamento de erros nas medidas

Erros de medição (E) estão presentes em todas os instrumentos. Consistem na diferença entre a indicação fornecida por um instrumento (I) e seu valor verdadeiro convencional (VVC), e pode ser modelado como uma combinação de uma componente aleatória (E_A) e outra sistemática (E_S). Os erros sistemáticos são muito comuns, e podem ser causados por degradação natural de componentes, deposição de detritos, entupimentos, entre outros motivos. São eles que efetivamente afetam os fechamentos de produção, já que provocam um desvio tendencioso, contaminando médias e totalizações, e só podem ser compensados se forem conhecidos. [8, 9]

A plataforma Nexum traz soluções efetivas para tratar os erros de medição. Erros grosseiros são previamente tratados por filtros especiais, capazes de compensar anomalias do sinal, que é reconstruído baseado em um modelo dinâmico específico para cada instrumento. Já os erros de natureza aleatória não afetam os fechamentos

de produção, tampouco as estimativas de perdas e estoques, já que o sistema adota reconciliação do tipo transacional, com um pré-processamento que faz as totalizações dos fluxos em janela que varia de 2 a 24 horas. Esta agregação é suficiente para eliminar os efeitos destas aleatoriedades na reconciliação de fechamento.

Já os erros sistemáticos, fator E_s , são os mais críticos para os balanços de massa e, conforme já explicado, só podem ser tratados se forem conhecidos. A solução da Nexum é buscar um valor para o fator E_s a partir de três fontes combinadas:

1. E_{s_dec} : O erro sistemático é declarado por profissional competente, e considerando durante um período de validade desta informação;
2. E_{s_hist} : O erro sistemático é obtido a partir do histórico de certificados de calibração do instrumento;
3. E_{s_est} : O erro sistemático é estimado pelos algoritmos de reconciliação, tanto de fechamento, quanto de medidas.

O terceiro utiliza a técnica de “Reconciliação de Medidas”, e detecta um desvio de tendência a partir de medidas adjacentes, ou seja, se vale da redundância de medidas em um balanço de massa que precisa ser satisfeito.

3 A CADEIA PRODUTIVA DA SAMARCO E SEUS DESAFIOS PARA A CONTABILIDADE METALÚRGICA

O processo de extração, concentração e conformação do minério da Samarco envolve dezenas de operações unitárias e centenas de pontos de medição de fluxos mássicos secos e úmidos, densidade, teor dos componentes, entre outros. Algumas medições são tecnicamente difíceis de se obter, enquanto outras seriam possíveis apenas com instrumentos de elevado custo de aquisição, instalação e manutenção. Assim, os pontos de medição acabam reduzidos até o mínimo necessário para uma operação controlada, de modo que a redundância só aparece em algumas regiões do processo.

A cadeia produtiva se inicia no material retirado das frentes de lavra, passando pela concentração do minério e tratamento de rejeitos. Em seguida, o material concentrado é transportado via minerodutos por cerca de quatrocentos quilômetros até uma segunda instalação de tratamento onde sofre uma conformação do tipo pelotização e é despachado por diferentes modais.

A **Figura 1** é um esquema com todas as macroáreas da cadeia da Samarco. As figuras que estão marcadas com linhas tracejadas são áreas contendo estoques de grande volume e de difícil mensuração, e, conforme explicado na seção 2.4, irão determinar a segmentação da cadeia. Entre eles estão, pilhas pulmão, espessadores, minerodutos, bacias e pátios de estocagem. Excluídos estes itens, sobram oito áreas que dão origem aos fluxogramas para a Reconciliação Transacional de Fechamento, e sete fluxogramas de conexão onde serão aplicadas as Reconciliações Medidas.

Esta abordagem, além de permitir o que o fechamento seja feito de maneira independente pelos especialistas de cada um dos oito segmentos do processo, faz com que as medições de estoque menos confiáveis sejam excluídas dos fluxogramas, e sejam reconciliadas somente em condições especiais, após declaração de topografia ou detecção de estacionariedade.

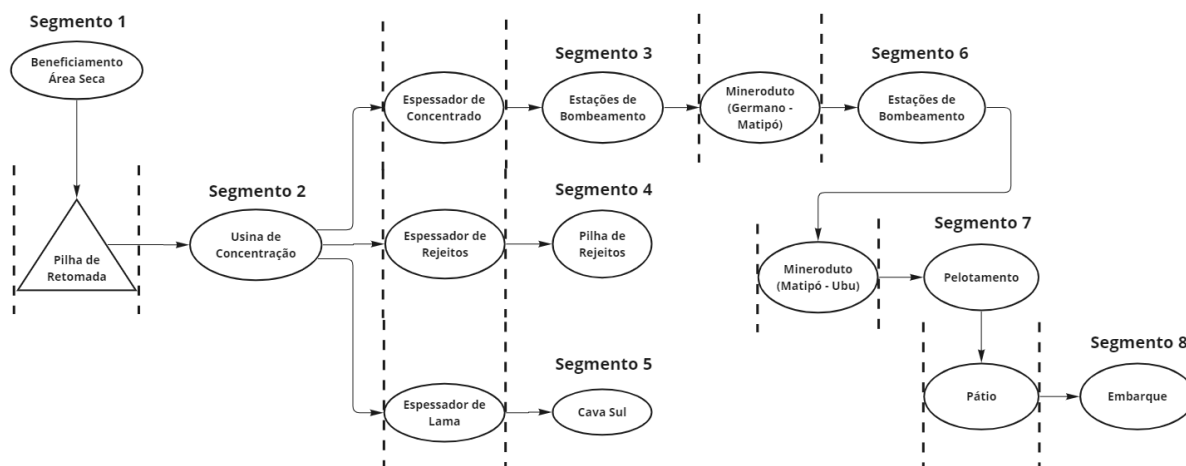


Figura 1 - esquema com as macroáreas da cadeia da Samarco

Para ilustração, o fluxograma do segmento “Usina de Concentração” é apresentado na Figura . A figura é um grafo direcionado, onde as arestas (setas) representam as movimentações de fluxos entre nodos (círculos), que, por sua vez, representam as operações de processamento ou estocagem destes fluxos.

Cada um dos nodos possui dentro de si a relação das arestas que saem, a composição química e vazão dos fluxos, além de uma listagem dos estoques que estão compreendidos pelo nodo. Desse modo, a variação de estoque dos tanques e caixas é levada em conta na reconciliação.

A edição de um fluxograma é realizada por uma interface própria, e se inicia com a criação dos nodos e arestas, representados por objetos gráficos mostrados no lado esquerdo da figura. Em seguida, cada nodo é editado nas janelas ilustradas à direita da figura. Nelas são feitas as associações entre variáveis da base de dados e atributos de fluxos e estoques.

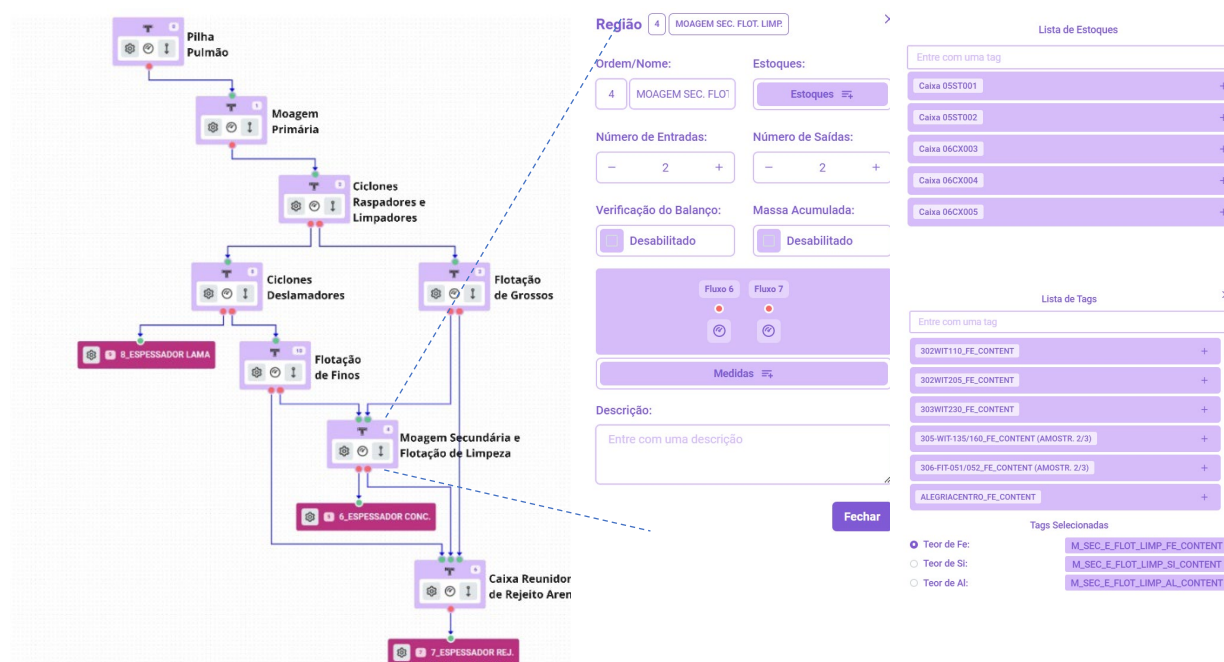


Figura 2 – Interfaces da Nexum Balance para edição de fluxos de processo

Cada um dos segmentos é reconciliado de maneira independente utilizando as medidas dos seus instrumentos. Apesar de essa abordagem possibilitar que os fechamentos sejam mais precisos por excluir os estoques com grande incerteza dos resultados, se um ou mais instrumentos possuir erros de tendência, podem ocorrer inconsistências entre segmentos vizinhos.

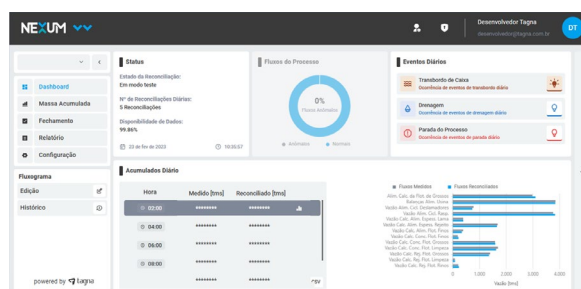
Para lidar com essa questão, a reconciliação de medidas une os fluxogramas utilizando o lançamento de uma topografia ou um período com estacionariedade confirmada do estoque estimado entre os fluxogramas. Uma vez que este estoque é conhecido, a totalização do fluxo da saída de um fluxograma pode ser comparada com o fluxo de entrada do próximo fluxograma. Na Tabela 2 estão apresentados alguns aspectos da reconciliação de cada um dos pontos de ligação de fluxogramas na cadeia produtiva estudada. Quando o estoque está associado a pilhas pulmão ou pátios, o elemento de conexão são os lançamentos do estudo topográfico. Já no caso de espessadores, são usadas medidas de torque, pressão e altura de interface para identificar períodos em que a massa estocada esteve estável.

Tabela 2 – Elementos para reconciliação de medidas e conexões entre fluxogramas

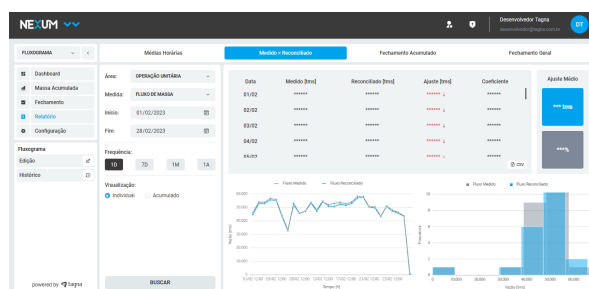
Ligação	Elemento de incerteza	Critério
Entre Britagem e Usina de Concentração	Estoque da Pilha Pulmão	Lançamento do resultado de topografia
Entre Usina de Concentração e Cava	Estoque no Espessador de Lama	Estacionariedade do Espessador (torque, altura de interface, pressão interna)
Entre Usina de Concentração e Filtragem	Estoque no Espessador de Rejeito	
Entre Usina de Concentração e Estação de Bombeamento	Estoque no Espessador de Concentrado	Estacionariedade do Bombeamento
Entre Estações de Bombeamento	Estoque do Mineroduto trecho I	
Entre estação de bombeamento e Ubu	Estoque do Mineroduto trecho II	Estacionariedade do Bombeamento
Entre a Usina de Pelotamento e o Porto	Estoque do Pátio	Lançamento do resultado de topografia

3.1. Relatórios de fechamentos e contabilidade de perdas físicas e estoques

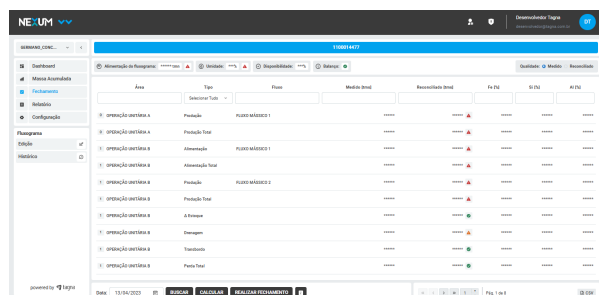
Para a apresentação dos dados reconciliados a pessoa competente pelo balanço de massa, foram construídas *interfaces* onde é possível consultar e confirmar os fechamentos de cada dia, em cada segmento do processo. Também foram incluídos indicadores de saúde dos dados em algumas das *interfaces*, para auxiliar no entendimento da necessidade de realizar uma análise mais apurada nos resultados apresentados, antes de aprová-los. A Figura 3 exemplifica algumas destas *interfaces* e as descreve brevemente na legenda abaixo de cada imagem.



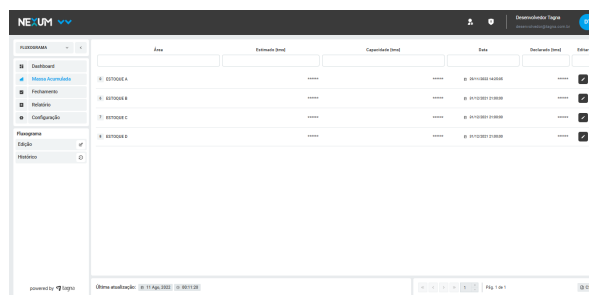
Tela de reconciliações parciais: Permite que seja acompanhada a produção parcial de um dia, com gráficos que disponibilizam estimativas reconciliadas das medidas periodicamente, ao longo do dia. Também é apresentada a qualidade dos dados.



Tela de medido x reconciliado: Comparar valores medidos e reconciliados ao longo do tempo. Permite avaliar ocorrência de erro de tendência em instrumentos, ou de perdas e incorporações não declaradas



Tela de fechamento: Cada segmento da cadeia é apresentado por vez nessa tela, onde é possível visualizar alimentação, produção, estoques e perdas. Também são apresentados os valores medidos e reconciliados para taxa mássica seca e teores em cada um dos registros.



Tela de massa acumulada: Possibilita recuperar o valor estimado para os estoques de grande capacidade que não possuem medições diretas, como pilhas e espessadores. Nela também pode ser inserido o valor do estoque das pilhas, para disparar uma reconciliação de medidas.

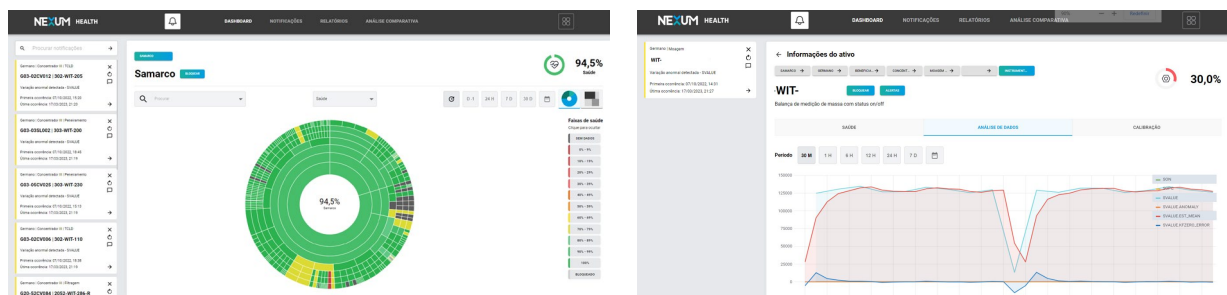
Figura 3 – Telas da Nexum Balance

3.2. Gestão inteligente dos instrumentos

Na contabilidade metalúrgica, os resultados dependem da acuracidade de inúmeras medidas de vazão, densidade, teor e nível de estoques, coletados em grande quantidade e em múltiplos pontos do processo. O mal funcionamento de um único desses instrumentos, caso ele esteja numa região crítica e de baixa redundância, irá comprometer o resultado, possivelmente sem que o problema seja notado pelo analista. É imprescindível, portanto, que se instaure uma gestão inteligente desses instrumentos.

Uma das inovações deste trabalho foi combinar o balanço de massa reconciliado com a gestão de instrumentos de medição. A gestão de instrumentos, executada pelo Nexum Health®, corrige erros de tendência e remove erros grosseiros e só então envia os dados para o módulo de balanço de massa, Nexum Balance®, acompanhados das incertezas determinadas para cada medida. E o balanço de massa, por sua vez, utiliza a redundância de medições para identifica possíveis erros de tendência, notificando o Nexum Health® sempre que detectar algum desvio.

Outra função da gestão de instrumentos é calcular uma nota de saúde dos instrumentos como combinação de diversos indicadores (espécie de OEE aplicado a instrumento de medição) e notificar degradações e falhas por meio de *treemaps*, *emails* e relatórios. A Figura 4 exemplifica algumas destas *interfaces* e as descreve brevemente na legenda abaixo de cada imagem.



Tela de visualização da saúde de instrumentos: Permite visualizar a condição atual e histórica dos ativos utilizados pelo módulo de reconciliação.

Análise de dados: É possível visualizar gráficos de tendência com a medição bruta e sua versão corrigida pelos algoritmos de validação.

Figura 4 – Telas da Nexum Health

4 RESULTADOS

O sistema de contabilidade metalúrgica proposto neste trabalho vem sendo implantado em etapas na cadeia da Samarco e já está em uso na usina de beneficiamento. O principal resultado é a mudança na rotina no fechamento de produção, que teve seu tempo reduzido de horas, para poucos minutos e teve sua complexidade original bastante simplificada. A primeira grande mudança foi assegurar à pessoa competente que o balanço de massa se baseou em dados validados pela gestão de instrumentos, sem risco de contaminação com erros grosseiros ou perda de dados. A segunda foi a integração automática dos dados, sem gasto de tempo com extrações em fontes diversas e gasto de tempo com digitações, além de eliminar erros decorrentes da manipulação manual de dados. E a terceira grande mudança foi assegurar fechamentos mais precisos, com resultados que não dependem da intervenção da pessoa competente para atribuir limites e incertezas para as variáveis baseado no sentimento e experiência. Hoje tais limites e incertezas são apoiados em critérios objetivos, rastreáveis, com base em modelos estatísticos e dados da calibração. E, por último, a quarta mudança observada é a viabilidade em integrar todos os fluxogramas e inventários, reconciliando medidas, apontamento de perdas e estoques e distribuindo erros de medição de toda a cadeia produtiva.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho explorou a conexão entre ferramentas de validação e reconciliação como elos essenciais no ciclo de vida do processo de contabilidade metalúrgica de um empreendimento. Ficou demonstrado que fechamentos de produção e estimativas de estoques, quando realizados automaticamente por tecnologias de análise de dados, permite atendimento ao nível de auditabilidade e transparência requeridos pelo padrão AMIRA P754.

E, apesar da vasta bibliografia sobre métodos de reconciliação de dados, a atuação de uma equipe multidisciplinar que combinou cientistas de dados, engenheiros de software e os especialistas em contabilidade metalúrgica da Samarco foi chave para superar a lacuna entre as proposições acadêmicas, que são focadas nos aspectos matemáticos do problema, e as questões reais relacionadas com cadeias produtivas de grande porte e seus desafios conforme mencionados neste trabalho.

O sistema testado na Samarco S.A. utilizando a Plataforma Nexum® Digital, módulos Balance e Health, se mostrou bem-sucedido ao atestar de maneira

coerente os fechamentos de produção, perdas e massas acumuladas ao longo da cadeia.

Agradecimentos

O sucesso deste trabalho se deve à atuação conjunta e multidisciplinar do time tecnológico da Tagna e das equipes Samarco de Engenharia de Processos, Centro de Operação Integrada e Planejamento (COI) e Tecnologia da Informação (TI), representados pelos autores deste artigo. Além disso, agradecemos à Automação da Samarco pelo suporte na caracterização e ajuste de instrumentos de campo e agradecemos aos times de operação de Germano, Matipó, Mineroduto, Ubu e Pátio/Porto pelo incansável suporte no detalhamento dos modelos matemáticos de suas respectivas áreas, com detalhes sobre fluxos de processo, incorporações, estocagem de material e incertezas de medição.

REFERÊNCIAS

- [1] NARASIMHAN, S.; JORDACHE, C. **Data Reconciliation and Gross Error Detection: An Intelligent Use of Process Data**. Gulf Professional Publishing. 1st edition, 1999.
- [2] CROWE, C. M. **Data reconciliation progress and challenges**. J. Proc. Cont, v. 6, n. 2/3, p.89-98, 1996.
- [3] KELLY, J. D. **Data Reconciliation & Validating Measurements**. Reliably Tracking Carbon & Losses, 2017.
- [4] BRAGA, A. R. **Metodologias e Métricas para Gerenciamento de Desempenho de Processos**. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, UFMG, Belo Horizonte, p. 116-120, 2017.
- [5] MIAO, Y., SU, H.; GANG, R.; CHU, J. **Industrial Processes: Data Reconciliation and Gross Error Detection**. Measurement + Control, v. 42, n. 7, 2009.
- [6] GAYLARD, P.G., RANDOLPH, N.G,. **Metal Accounting and Corporate Governance**. The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy VOLUME 114 JANUARY 2014, 83
- [7] MAH, R. S.; Stanley, G.M.; Downing D.M. **Reconciliation and Rectification of Process Flow and Inventory Data**. Ind. Eng. Chem., Process Des. Dev., Vol. 15, No. 1, 1976
- [8] ALBERTAZZI, A. **Metrologia, parte I**. Florianópolis - UFSC, 2004. 130p.
- [9] ROMAGNOLI, J.; SANCHEZ, M. **Data Processing and Reconciliation for Chemical Process Operations**. Elsevier, 1st edition, p. 25-52, 1999.
- [10] SMIN-FO-GSU-001. **Serviços De Desenvolvimento E Implementação De Um Sistema Dvr A Serem Prestados Para A Samarco Mineração S/A**. Especificação Técnica. Gerencia de Engenharia de Processo, Automação & Instrumentação. Escopo de Contratação. Maio de 2021.